

СУДОВО-МЕДИЧНІ АСПЕКТИ СУЧАСНОЇ ВИБУХОВОЇ ТРАВМИ

Іван Савка¹, Ігор Коробко², Віталій Савка¹

¹Заклад вищої освіти Буковинський державний медичний університет МОЗ України, м. Чернівці, Україна

²Державний заклад Луганський державний медичний університет МОЗ України, м. Рівне, Україна

Резюме. Як свідчить аналіз новітньої літератури, у світі все більше стає масштабних конфліктів з використанням потужної зброї, що начинена різноманітними вибуховими речовинами. Території все більшої кількості країн стають аренами проведення військових операцій з використанням вибухової зброї різного радіусу дії. Все це призводить до значного збільшення кількості вибухових травм і необхідності їх всебічного вивчення.

Мета дослідження. Дослідити судово-медичні аспекти сучасної вибухової травми у світі, піддавши аналізу всі доступні літературні джерела з передових високо цитованих наукометричних баз.

Матеріали та методи. Матеріалом дослідження були результати наукових досліджень, в яких розкрито судово-медичні аспекти: клінічні прояви та морфологічні особливості первинних, вторинних, третинних, четвертинних і п'ятинних вибухових травм. Шляхом застосування методів анутовання, хронологічної систематизації наукових робіт, порівняльного та контент-аналізу отримано конкретні результати, що відображають стан вивчення вибухової травми сучасними дослідниками.

Науково-дослідна робота. Виконане дослідження є фрагментом комплексної науково-дослідної роботи кафедри судової медицини та медичного правознавства Буковинського державного медичного університету «Використання сучасних морфологічних та фізичних методів для діагностики часу та причини настання смерті, виникнення тілесних ушкоджень, розвитку віддалених та наближених їх наслідків з метою вирішення нагальних завдань правоохоронних органів та актуальних питань судово-медичної науки та практики» (номер державної реєстрації 0123U101978, терміни виконання січень 2023-грудень 2027 року).

Біоетика. Матеріали дослідження розглянуті і схвалені комісією з питань біоетики Буковинського державного медичного університету (Протокол № 7 від 16.04.2026).

Результати. Відмічено все наростаючий інтерес до різноманітних судово-медичних аспектів сучасної вибухової травми. Насамперед його проявляють дослідники з країн, де відбувалися чи ведуться інтенсивні бойові дії або сталися резонансні події з використанням вибухових речовин і наявністю багатьох потерпілих осіб.

Висновки. Головну увагу дослідники звертають на анатомічні, функціональні, морфологічні, клінічні та гістологічні особливості вибухових травм при судово-медичній їх оцінці залежно від виду та маси вибухової речовини, відстані до неї, місця та обставин події, а також враховуючи наявність чи відсутність захисного спорядження у потерпілих. Сучасна класифікація вибухової травми включає її розподіл на первинні-п'ятинні тілесні ушкодження, хворобливі стани й наслідки, спричинені різноманітними факторами ураження внаслідок вибуху.

Ключові слова: вибухова травма, вибухові пристрої, вибухова речовина, фактори ураження, судова медицина, судово-медична експертиза.

FORENSIC-MEDICAL ASPECTS OF THE MODERN BLAST TRAUMA

Ivan Savka¹, Ihor Korobko², Vitaliy Savka¹

¹Bukovinian State Medical University of the Ministry of Health of Ukraine, Chernivtsi, Ukraine

²Luhansk State Medical University of the Ministry of Health of Ukraine, Rivne, Ukraine

Abstract. As evidenced by the analysis of recent references, there are an increasing number of large-scale conflicts worldwide involving the use of powerful weapons charged with various explosives. The territories of an increasing number of countries are becoming arenas for military operations employing explosive weapons of varying ranges. All this leads to a significant increase in the number of blast injuries and the need for their comprehensive study.

The aim of the study. To investigate the forensic aspects of modern blast trauma in the world by

analyzing all available literary sources from leading, highly cited databases.

Materials and methods. The study material comprised the results of scientific research that revealed forensic aspects, clinical manifestations, and morphological features of primary, secondary, tertiary, quaternary, and quinary blast injuries. By applying methods of annotation, chronological systematization of scientific works, comparative analysis, and content analysis, specific results reflecting the current state of studying blast trauma by modern researchers were obtained

Scientific research. This study constitutes a fragment of a comprehensive research work conducted by the Department of Forensic Medicine and Medical Law of the Bukovinian State Medical University, titled "Utilization of modern morphological and physical methods for diagnosing the time and cause of death, the occurrence of bodily injuries, and the development of their remote and immediate consequences, aimed at addressing urgent tasks of law enforcement agencies and current issues of forensic medical science and practice" (State registration number 0123U101978, implementation period: January 2023-December 2027).

Bioethics. The research materials have been reviewed and approved by the Bioethics Commission of Bukovinian State Medical University (Protocol No. 7 dated April 16, 2026).

Results. A growing interest in various forensic aspects of modern blast trauma has been noted. This interest is primarily shown by researchers from countries where intensive hostilities have occurred or are ongoing, or where high-profile events involving the use of explosives and the presence of many victims have taken place.

Conclusions. Researchers focus primarily on the anatomical, functional, morphological, clinical, and histological features of blast injuries in their forensic assessment, depending on the type and mass of the explosive, the distance from it, the location and circumstances of the incident, as well as considering the presence or absence of protective equipment on the victims. The modern classification of blast trauma includes its division into primary through quinary bodily injuries, pathological conditions, and consequences caused by various damaging factors resulting from an explosion.

Key words: blast trauma, explosive devices, explosive material, damage factors, forensic medicine, forensic-medicine expertise.

Вступ. У сучасних підручниках, методичних матеріалах, періодичній літературі можна зустріти чимало визначень поняття вибух. Але всіх їх можна звести до кількох ключових елементів: першочергово має бути вибухова речовина (ВР), мають бути створені відповідні умови для її займання (раптового розкладання), що супроводжується виділенням великої кількості енергії та газів упродовж дуже короткого періоду часу, зазвичай кількох мілісекунд. Як результат, утворюється раптова хвиля підвищеного тиску повітря – вибухова хвиля (ВХ), за якою безпосередньо слідує хвиля негативного тиску. ВХ впливає на все оточуюче середовище, що перебуває на її шляху, а ступінь впливу залежить від типу й кількості ВР та відстані до епіцентру вибуху. ВХ є основним фактором ураження, що спричинює первинні тілесні ушкодження, розповсюджується з надзвуковою швидкістю біля 2414 км/год, спричиняючи надлишковий тиск 690 кПа. Безпосередньо за ВХ слідує ураганний вітер зі швидкістю біля 200 км/год. ВХ, що на своїй вершині несе надмірний тиск понад 400 кПа, прийнято вважати потенційно летальною. Щоправда, тут слід брати до уваги і місцезнаходження об'єкта, оскільки вибухи між твердими поверхнями (у закритих просторах) посилюються у 2-9 разів через ефект відбиття ВХ, а самі постраждалі можуть отримувати у 2-3 рази більш масивні тілесні ушкодження, порівняно із тими, що знаходяться на відкритому просторі [1].

Проходячи через тіло ВХ впливає на біологічні тканини як своїм імпульсом, так і різницею зміненого тиску.

Через складність самого організму людини, що поєднує в собі численні середовища різної щільності та виникнення різноманітних ефектів внаслідок вибуху – і механізми реакції при їх взаємодії можуть бути самими різноманітними: від місцевих та церебральних реакцій до системних змін. При цьому такі системні реакції як повітряна емболія, активація вегетативної нервової системи, зміни в судинах та системне запалення – можуть значно обтяжувати початкові ушкодження від вибуху.

ВХ спричинює досить різноманітний спектр ефектів на тіло людини: вона діє безпосередньо на тіло; несе багато снарядів та уламків; відкидає тіло до оточуючих поверхонь та предметів; обпікає тіло й одяг; отрує організм продуктами згоряння, хімічними речовинами, пилюкою з бактеріями, що доносить до потерпілих, в т.ч. може чинити на них радіаційний вплив.

Тому більшість сучасних дослідників виділяють окрім *первинних* – *вторинні*, *третинні*, *четвертинні*, а також *п'ятинні* тілесні ушкодження від різноманітних факторів ураження внаслідок вибуху [1, 2].

Мета дослідження. Дослідити судово-медичні аспекти сучасної вибухової травми у світі, піддавши аналізу всі доступні літературні джерела з передових високо цитованих наукометричних баз даних.

Матеріали та методи. Матеріалом дослідження були результати наукових робіт, в яких розкрито судово-медичні аспекти: клінічні прояви та морфологічні особливості первинних, вторинних, третинних, четвертинних і п'ятинних вибухових травм. Шляхом застосування методів анування, хронологічної систематизації наукових робіт, порівняльного та контент-аналізу отримано конкретні результати, що відображають стан вивчення вибухової травми сучасними дослідниками.

Всього нами було опрацьовано понад 2,5 тис. наукових досліджень у переважній своїй більшості опубліковані за останні 5 років, в основному з таких високо цитованих наукометричних баз даних як: Scopus, PubMed, Science Direct, Web of Science, Medline with Full Text (EBSCO) та ін.

Науково-дослідна робота. Виконане дослідження є фрагментом комплексної науково-дослідної роботи кафедри судової медицини та медичного правознавства Буковинського державного медичного університету «Використання сучасних морфологічних та фізичних методів для діагностики часу та причини настання смерті, виникнення тілесних ушкоджень, розвитку віддалених та наближених їх наслідків з метою вирішення нагальних завдань правоохоронних органів та актуальних питань судово-медичної науки та практики» (номер державної реєстрації 0123U101978, терміни виконання січень 2023-грудень 2027 року).

Біоетика. Матеріали дослідження розглянуті та схвалені комісією з питань біоетики Буковинського державного медичного університету (Протокол № 7 від 16.04.2026).

Результати дослідження та їх обговорення.

Більшість авторів виділяють такі види первинної взаємодії ВХ із середовищем, що сприймає навантаження у вигляді кінетичної енергії, залежно від його щільності як: сплеск, імпульсія та інерційні ефекти [1,2].

Сплеск – відбувається між двома середовищами з різною щільністю при якому хвиля стиснення відбивається у більш щільному на межі їх розділення.

Імпульсія – трапляється у рідкому середовищі, що містить газ, раптово підвищуючи тиск у бульбашках газу та розриваючи їх.

Інерційні ефекти – виникають на межі двох середовищ, прискорюючи легші з них та спричиняючи тут значні напруження.

Таким чином ті органи, які містять більшу кількість меж розділу повітря-тканина, є більш вразливими до первинних вибухових травм (ВТ).

Класичними органами-мішенями для первинних ушкоджень при вибусі є:

- *легені* – забій легені, пневмоторакс, повітряна емболія, ураження паренхіми та підшкірна емфізема можуть виникнути у потерпілих при значеннях надмірного тиску 276 кПа і вище.
- *головний мозок* – ушкодження його речовини та подразнення мозкових оболонок, симптоми, що характерні для струсів головного мозку.
- *орган слуху* – розриви барабанної перетинки, ушкодження середнього вуха, вивихи та руйнації слухових кісточок вже починаються при значеннях надмірного тиску 35 кПа і вище.
- *органи черевної порожнини* – крововиливи та розриви товстого кишківника, забої, струси та розриви інших порожнистих і рідше паренхіматозних органів, надриви яєчка – діагностують при значеннях надмірного тиску 75-100 кПа і вище.
- *орган зору* – крововиливи та розриви структур очного яблука та довкола орбіти.

При дослідженні уражень *легеневої тканини* ряд дослідників описують дифузну альвеолярну деструкцію, що призводить до тяжкої дихальної недостатності, розвитку гострого респіраторного дистрес-синдрому з високим рівнем летальності [3].

В експериментах на мишах із надмірним тиском ВХ 50 кПа науковці описали інфільтрацію запальних клітин, внутрішньо-альвеолярні крововиливи з ушкодженнями структури легеневої тканини, набряком, підвищенням рівня ряду інтерлейкінів та нейтрофільних позаклітинних пасток. ВХ індукує також запалення легеневої тканини і розвиток коагулопатії в експериментах на щурах [4,5].

Дослідники, які вивчали вплив ВХ із надлишковим тиском 406 кПа в експериментах на дорослих самцях свиней відмітили 50% смертність із негайним розвитком гіпоксії, зниженням серцевого викиду, зменшенням об'єму крові та патологічними даними легеневого ультразвуку до 6 годин [6].

Про 50% смертність кіз в експериментах внаслідок підриву ВР на відстані 2-6 метрів від них також повідомляють і інші вчені, в основному, від тяжких ушкоджень легень [7].

З метою вивчення ураження структур *головного мозку* на макрорівні від впливу ВХ науковці створили біоінженерну тривимірну систему культивування тканин головного мозку людини у вигляді гідрогелів, яку поміщали в надрукований на 3D-принтері сурогатний матеріал, подібний до черепа, що містить рідке середовище, а потім у тримачі всередині імітатора вибуху. Це дозволило виявити вплив тільки ВХ без виникнення вторинних ушкоджень у вигляді підвищення активності лактатдегідрогенази та вивільнення глутамату з культур, що свідчить про їх клітинне ушкодження. Крім того, автори спостерігали значне збільшення аксональних варикозних розширень після вибуху [8].

Інші автори з метою вивчення нейропатологічних наслідків вибуху проводили експерименти на 83 щурах лінії Sprague Dawley, голови яких піддавали впливу ВХ із піковим надлишковим тиском від 172 до 421 кПа всередині закритої ударної труби, тоді як тіло їх було захищене. Нейропатологічні ознаки впливу вибуху характеризували морфологічними змінами, включаючи ураження нейронів та апоптоз, набряк мозку та ушкодження цереброваскулярних судин на шляху ударної хвилі, експресію ключових білків, підтвердженою за допомогою вестерн-блот аналізу [9].

У продовження експериментів на щурах в ударній трубці при надлишковому тиску ВХ 130 кПа, науковцями були використані конфігурації «все тіло», «тільки голова» та «тільки тулуб» для розмежування кожного механізму. Як результат – спостерігали значні подібні зміни мозку щурів, підданих впливу на все тіло та лише на голову. Їхній аналіз таким чином показав, що прямий механізм є основним чинником вибух-індукованих змін у тканинах мозку при вибуховій травмі [10].

Зміну співвідношення міді і цинку разом із накопиченням заліза у мозочку щурів після впливу на них ВХ із надлишковим тиском 26-36 кПа спостерігали науковці на 7-й день експерименту із формуванням «вадного кола та ураженням нейронів» [11].

Специфічні зміни білків у гіпокампі щурів, яких неодноразово піддавали впливу ВХ у вигляді підвищення рівня MAG13 – каркасного білка в міжклітинних контактах, дали підставу пошукувачам сформуванню гіпотезу про існування безсимптомного вибух-індукованого молекулярно-зміненого стану у центрах тканини мозку піддослідних [12,13].

Дифузні зміни по всій тканині мозку в юкатанських свинок у вигляді нейродегенерації та підвищення активації мікроглії/макрофагів виявили вчені під час експериментів із піковим надмірним тиском 280-525 кПа [14].

Чергові дослідники спробували розкрити механізми черепно-мозкової травми, спричиненої ВХ, з використанням методу оцінки енергії. Спочатку вони створили скінченно-елементну модель голови людини (що включає шкіру, череп, мозок та інші структури) шляхом проведення магнітно-резонансної томографії. Моделювання ударної хвилі виконували з використанням моделі взаємодії рідини та твердого тіла у фронтальному, бічному і тильному напрямках. Результати показали, що за умови впливу ударної хвилі травма мозку спричинена комбінованою дією прискорення голови і деформації шкіри, м'язів обличчя, мозку та спинномозкової рідини, а здатність голови до розсіювання енергії не залежить від напрямку удару [15].

Орган слуху також є одним із найбільш чутливих до ВТ. Так, дослідивши 47 пацієнтів чоловіків після вибухових травм лікарі університетської клініки Басри (Ірак) виявили в них втрату слуху, шум у вухах, перфорацію барабанної перетинки (у 93,6% випадків) [16].

На перфорацію барабанної перетинки, втрату слуху, шум у вухах, відчуття закладеності вуха та нейросенсорну приглухуватість, як найбільш поширені наслідки з боку органу слуху від вибухів вказують й інші вчені [17,18,19,20].

Інші дослідники акцентують увагу, що перфорація барабанної перетинки, спричинена ВТ, не має захисного ефекту для внутрішнього вуха [21].

Первинні ушкодження органів черевної порожнини внаслідок дії ВХ переважають у тих осіб, хто вижив після вибухів у закритих просторах, при цьому дослідники акцентують увагу на досить частій діагностиці множинних розривів клубової кишки [22].

На досить частому травмуванні різних відділів кишківника в якості орана-мішені при первинному вибуховому ураженні звертають увагу й інші автори, частота яких доходить до 71,4%, а паренхіматозних становить біля третини [23 24].

Після одноразового впливу ВХ в ділянці середини епігастрію мишей дослідники оцінювали наслідки травми макро-, мікроскопічно та біохімічно. Макроскопічні зміни органів черевної порожнини фіксували в такій послідовності в порядку зменшення частоти: печінка – підшлункова залоза – селезінка – ліва нирка – кишківник – права нирка – інші органи – легені (з мікроскопічними ушкодженнями печінки та підшлункової залози). Також спостерігали зниження середнього артеріального тиску, розвиток системного ушкодження та загального запалення [25].

Наступні автори в результаті ряду експериментів зі свинками, дійшли висновків, що при незахищеній передній черевній стінці, ударна хвиля розповсюджується через ділянку епігастрію та підбер'я, спричиняючи забої легень і травму селезінки. Тому вони рекомендують звернути увагу на це розробників захисних засобів для удосконалення їх протективних властивостей [26].

Імуносупресивні ефекти у вигляді транзиторної недостатності кісткового мозку, довготривалих змін у частоті та профілі популяцій клітин-попередників, зниження життєздатності гемопоетичних стовбурових клітин і плюрипотентних клітин-попередників, Т-клітин у селезінці спостерігали науковці у мишей після впливу ВХ величиною 130 кПа у крові, кістковому мозку та селезінці [27].

З боку органу зору після вибух-індукованих ушкоджень лікарі діагностували втрату бінокулярного зору, випадіння полів і зниження гостроти зору, травми рогівки (у 25% ветеранів) [28].

Про можливість довготривалого ушкодження сітківки та нейрозапалення, ураження зорового перехрестя і тракту після первинного впливу ВХ на мишей величиною 300 кПа вказують інші науковці [29, 30, 31].

Транзиторне підвищення тиску як у скловидному тілі, так і в спинномозковій рідині, високошвидкісні деформації по всьому зоровому нерву під час вибуху з аксональним ушкодженням і втратою зору у пацієнтів, які зазнали первинного вибуху, описали наступні дослідники [32].

Найвищі напруження та деформації спостерігали науковці при фронтальному вибуху в місцях прикріплення прямих м'язів ока, де склера є найтоншою та схильною до розриву. При цьому кут вибуху не відіграє значної ролі у підвищенні внутрішньоочного тиску до 2900 мм.рт.ст. в експериментах на моделях ока людини з масою саморобного вибухового пристрою 1-2 кг та відстані від вибуху 2-4 метри [33].

При первинних ВТ очей часто страждають обидва ока з негативним прогнозом при розривах очного яблука та більшими шансами на покращання при їх контузії [34].

Всі ці зміни в органах-мішенях можуть починатися як гостро, так і бути відстроченими до 48 годин, а надмірний тиск може впливати на центральну нервову, опорно-рухову і серцево-судинну системи, а може спричинити системний шок, який вщухатиме від кількох хвилин до годин.

Вторинні ушкодження виникають від уламків та осколків, які переміщуються під дією ВХ чи вітру. Виникаючи раптово і рухаючись зі значною швидкістю вони призводять до численних травм, які за своїми морфологічними особливостями нагадують дію тупих і гострих предметів та охоплюють кілька анатомічних ділянок тіла (садна, синці, рани, розриви тощо). Вторинні ушкодження трапляються частіше, ніж первинні, оскільки уламки розлітаються далі, ніж діє вибухова хвиля і є найпоширенішою причиною смертності серед постраждалих від вибуху.

Голова, шия, кінцівки та інші відкриті ділянки є зонами найвищого ризику травмування. Оскільки сила вибуху може надати уламкам швидкості, яка в багато разів перевищує швидкість кулі, то такі травми часто включають у себе наскрізні, дотикові чи сліпі проникаючі поранення, переломи, ампутації, рвані рани, вивихи та ушкодження м'яких тканин [2].

Кількість таких травм зростає пропорційно відстані до епіцентру вибуху [35].

Серед цивільних осіб переважна кількість цих ушкоджень (63%) були виявлені в органах черевної порожнини [36].

Внаслідок вибуху у 2020 році в порту Бейрута 2700 метричних тон аміачної селітри – більшість травм були вторинними (82,3%, спричинені здебільшого уламками скла), з переважною локалізацією в ділянці голови (34%) та верхніх кінцівок (31,2%) [37].

В експериментах на ягнятах дослідники вибухової травми встановили досить високу проникну здатність осколків різної форми при наданні їм прискорення в діапазоні 31-36 м/с, з ймовірністю 50% летального ураження, що не залежало від ураження конкретної ділянки серця [38].

Третинні ушкодження виникають від наслідків фізичного переміщення тіла та взаємодії з предметами навколишнього середовища, яке відбувається під впливом ВХ. Характер цих травм залежить з якою силою та до чого ударяється тіло. Наприклад, черепно-мозкову травму, переломи, спричинені руйнацією будівель, компресійну механічну асфіксію внаслідок обвалу перекриття бліндажу чи землі в окопі – заведено вважати третинними ушкодженнями від вибуху. Сюди ж відносять ушкодженнями м'яких тканин, переломи кісток, хребта, травми паренхіматозних і порожнистих внутрішніх органів, які є подібними до тяжких тілесних ушкоджень, отриманих внаслідок дорожньо-транспортних пригод чи падіння зі значної висоти [1,2].

Так, піддавши аналізу результати обстежень потерпілих внаслідок нещодавнього конфлікту в Іраку та Сирії під час операції «Непохитна рішучість», науковці з'ясували, що краніофасціальні травми становили до 40% усіх випадків. Найпоширенішими травмами були травми м'яких тканин

(57%), за ними слідували черепні (44%) та орбітальні-лицьові (31%). Супутні травми тулуба або кінцівок спостерігали у 46 пацієнтів (48%) [39].

Відомості, отримані з Ізраїльського національного реєстру травм військовослужбовців за 2023-2024 роки вказують, що основною причиною травм були вибухи (53,8%), за якою слідувала травма тупими предметами (24,7%), при цьому у 50,5% потерпілих діагностували політравму, а травми хребта найчастіше локалізувалися у попереково-крижовій ділянці [40].

Наступні автори, які вивчали епідеміологію травм серед військовослужбовців (без великих ампутацій) також відмітили високий відсоток травм, отриманих в результаті вибухів (75%) зі схожим розподілом між нижніми (52%) і верхніми (48%) кінцівками. Майже половина (48%) усіх травм кінцівок були відкритими ранами, за якими слідували переломи (20%) та контузії чи поверхневі травми (16%) [41].

Четвертинні ушкодження складають всі інші ушкодження, що спричинені безпосередньо вибухом, але не віднесені до інших механізмів. Наприклад, вони можуть включати опіки, отруєння токсичними продуктами вибуху, біологічними чинниками, розлади психічної діяльності і т.п. [42].

Сюди ж і слід віднести травму через обструкцію внаслідок набряку верхніх дихальних шляхів та пневмонію, які розвинулися через вдихання продуктів вибуху [43].

Всі ці травми, включаючи глибокі опіки, хімічні інгаляційні ушкодження і третинні травми внаслідок детонацій у замкненому просторі посилюються врази при використанні термобаричної зброї [44].

П'ятинні ушкодження – це хворобливі стани чи захворювання, що виникають внаслідок впливу хімічних, біологічних або радіологічних речовин, під час вибуху ВР, наприклад – системне запалення, радіаційна хвороба, цереброваскулярні дегенеративні процеси і т.п. [45].

Так, деякі дослідники зазначають, що 91% ветеранів, які зазнали ВТ під час участі в бойових діях повідомляють про проблеми з дихальною системою (від хронічного кашлю до хронічного обструктивного захворювання легень) [46].

Загальновідомою є і хронічна нейротравма серед цивільних та ветеранів із числа військових осіб, які зазнали впливу вибухових пристроїв. Уражений персонал може мати підвищений ризик довгострокового зниження когнітивних функцій, включаючи розлади, пов'язані з хворобою Альцгеймера чи лобово-скроневою деменцією [47].

Усі ці первинні-четвертинні ушкодження часто поєднуються між собою, спричиняючи поліорганну травму з високим рівнем захворюваності та смертності. Клінічна картина при цьому може бути гетерогенною і змінною, причому особливі діагностичні труднощі становлять прихована баротравма легень, відстрочена перфорація порожнистого органа, внутрішньочерепний крововилив та судинні ушкодження [2].

Тому наукові огляди інших авторів узагальнюють біологічні ефекти вибухових ударних хвиль, застосування традиційних моделей оцінки та їхні обмеження, а також новітні технології – клітинні та органоїдні моделі й застосування штучного інтелекту [48,49].

Основні відомості про вплив ВР на організм людини, у тому числі й про судово-медичні аспекти сучасної ВТ ми отримуємо при аналізі наукових повідомлень щодо наслідків активних воєнних дій у різних частинах світу чи нещасних випадків, пов'язаних із детонацією ВР [50,51].

Тепер й українські лікарі, науковці, вчені почали висвітлювати різні аспекти сучасної ВТ, починаючи з 2014 після початку вторгнення військ російської федерації на територію нашої держави, виходячи з реалій воєнного сьогодення [52,53,54,55].

За ці роки, а особливо з 2022 року, ВТ стала основною причиною різного роду тілесних ушкоджень і летальних наслідків серед цивільного населення і військовослужбовців у нашій країні [56,57,58,59,60].

Отже, за результатами проведеного дослідження відзначено все наростаючий інтерес до різноманітних судово-медичних (анатомічних, функціональних, морфологічних, клінічних та інших) аспектів сучасної ВТ. Насамперед, його проявляють дослідники з країн, де відбувалися чи ведуться інтенсивні бойові дії, або сталися резонансні події з використанням ВР та наявністю багатьох потерпілих осіб.

Висновки.

1. Через поширення військових конфліктів у світі на території все більшої кількості держав, вибухова травма стає предметом дослідження багатьох сучасних науковців, особливо в її судово-медичних аспектах.

2. Головну увагу дослідники звертають на анатомо-морфологічні, функціональні, клінічні та гістологічні особливості вибухових травм при судово-медичній їх оцінці залежно від виду та маси

вибухової речовини, відстані до неї, місця та обставин події, а також враховуючи наявність чи відсутність захисного спорядження у потерпілих.

3. Сучасна класифікація вибухової травми включає її розподіл на первинні-п'ятинні тілесні ушкодження, хворобливі стани й наслідки, спричинені різноманітними факторами ураження внаслідок вибуху.

Авторська декларація. Автори декларують відсутність плагіату, конфлікту інтересів та джерел зовнішнього фінансування відносно цієї статті.

Внески авторів:

Савка І.Г. – адміністрування дослідження, вибір методології дослідження, рецензування та редагування остаточного тексту.

Коробко І.С. – концептуалізація дослідження, написання робочого варіанту тексту, здійснення порівняльного аналізу.

Савка В.Г. – пошук літературних джерел, їх анування і систематизація, підготовка супровідної документації.

Література

1. Committee on Gulf War and Health: Long-Term Effects of Blast Exposures; Board on the Health of Select Populations; Institute of Medicine. Gulf War and Health, Volume 9: Long-Term Effects of Blast Exposures. Washington (DC): National Academies Press (US); 2014 Apr 14. doi: 10.17226/18253
2. Jorolemon MR, Patel PJ. Blast Injuries. 2026 Feb 22. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2026 Jan. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK430914/>
3. Li J, Zhang J, Shi M, Yu S, Ji M, Liang Y, et al. Crosstalk between Inflammation and Hemorrhage/Coagulation Disorders in Primary Blast Lung Injury. *Biomolecules*. 2023 Feb 10;13(2):351. doi: 10.3390/biom13020351.
4. Meng XY, Lu QY, Zhang JF, Li JF, Shi MY, Huang SY, et al. A novel animal model of primary blast lung injury and its pathological changes in mice. *J Trauma Acute Care Surg*. 2022;93(4):530-7. doi: 10.1097/TA.0000000000003571.
5. Meng X, Li J, Lu Q, Zhang J, Zheng Y, Liu Z, et al. Neutrophil extracellular traps mediate inflammation and coagulation dysregulation in primary blast lung injury. *Biochem Pharmacol*. 2025 Nov;241:117149. doi: 10.1016/j.bcp.2025.117149. Epub 2025 Jul 11.
6. Shao S, Wu S, Liu J, Liao Z, Wu P, Yao Y, et al. Dynamic pathophysiological features of early primary blast lung injury: a novel functional incapacity pig model. *Eur J Trauma Emerg Surg*. 2025 Jan 24;51(1):60. doi: 10.1007/s00068-024-02672-y.
7. Yang B, Feng L, Wang H, Yao Y, Xiong K, Wang S. Prediction of primary blast lung injury outcomes in goats using CT and injury factors. *Eur J Trauma Emerg Surg*. 2025 Nov 14;51(1):327. doi: 10.1007/s00068-025-03014-
8. Snapper DM, Reginauld B, Liaudanskaya V, Fitzpatrick V, Kim Y, Georgakoudi I, et al. Development of a novel bioengineered 3D brain-like tissue for studying primary blast-induced traumatic brain injury. *J Neurosci Res*. 2023 Jan;101(1):3-19. doi: 10.1002/jnr.25123.
9. Zhu X, Chu X, Wang H, Liao Z, Xiang H, Zhao W, et al. Investigating neuropathological changes and underlying neurobiological mechanisms in the early stages of primary blast-induced traumatic brain injury: Insights from a rat model. *Exp Neurol*. 2024 May;375:114731. doi: 10.1016/j.expneurol.2024.114731.
10. Rubio JE, Unnikrishnan G, Sajja VSSS, Van Albert S, Rossetti F, Skotak M, et al. Investigation of the direct and indirect mechanisms of: 34362935; PMID: PMC8346555. primary blast insult to the brain. *Sci Rep*. 2021 Aug 6;11(1):16040. doi: 10.1038/s41598-021-95003-9.
11. Kozlova Y, Kozlov S. Changes of trace elements in the cerebellum and their influence on the rats behavior in elevated plus maze in the acute period of mild blast-induced brain injury. *J Trace Elem Med Biol*. 2023 Jul;78:127189. doi: 10.1016/j.jtemb.2023.127189.
12. Iacono D, Hatch K, Murphy EK, Cole RN, Post J, Leonessa F, et al. Proteomic Changes in the Hippocampus after Repeated Explosive-Driven Blasts. *J Proteome Res*. 2024 Jan 5;23(1):397-408. doi: 10.1021/acs.jproteome.3c00628.
13. Iacono D, Murphy EK, Stimpson CD, Leonessa F, Perl DP. Double Blast Wave Primary Effect on Synaptic, Glymphatic, Myelin, Neuronal and Neurovascular Markers. *Brain Sci*. 2023 Feb 8;13(2):286. doi: 10.3390/brainsci13020286.
14. McNeil E, Walilko T, Hulbert LE, VanMeter JW, LaConte S, VandeVord P, et al. Development of a Minipig Model of BINT From Blast Exposure Using a Repeatable Mobile Shock Expansion Tube. *Mil Med*. 2023 Mar 20;188(3-4):e591-e599. doi: 10.1093/milmed/usab409.
15. Liu Y, Lu Y, Shao Y, Wu Y, He J, Wu C. Mechanism of the traumatic brain injury induced by blast wave using the energy assessment method. *Med Eng Phys*. 2022 Mar;101:103767. doi: 10.1016/j.medengphy.2022.103767.
16. Hussain SM, Saeed HK, Ali AH. Tinnitus after Blast Injury; a Prospective Study in Basrah, Iraq. *Int Tinnitus J*. 2022 Dec 1;26(2):122-6. doi: 10.5935/0946-5448.20220019.
17. Debenham L, Khan N, Nouhan B, Muzaffar J. A systematic review of otologic injuries sustained in civilian terrorist explosions. *Eur Arch Otorhinolaryngol*. 2024 May;281(5):2223-33. doi: 10.1007/s00405-023-08393-z.

18. Mühlmeier G, Tisch M. Blast and explosion traumas-effects on the middle and inner ear based on the example of Bundeswehr foreign missions. *HNO*. 2023 Jan;71(1):48-56. doi: 10.1007/s00106-022-01248-9.
19. Karaçaylı C, Özaydın ND, Şimşek K, Satar B. Relationship between hearing loss and body injuries caused by various firearms at a war site: A retrospective study. *Ulus Travma Acil Cerrahi Derg*. 2025 Aug;31(8):747-57. doi: 10.14744/tjtes.2025.52347.
20. Barylyak R, Skarzyński PH, Deja P, Kołodziejak A, Horoliuk DO, Skarzyński H. Audiological and Middle Ear Outcomes in Ukrainian Soldiers with Traumatic Tympanic Membrane Perforation. *Med Sci Monit*. 2025 Jul 11;31:e948326. doi: 10.12659/MSM.948326.
21. Taşlı H, Gökğöz MC, Çoban VK, Nagiyev Z, Karakoç Ö. Does tympanic membrane perforation have a protective effect on the inner ear in blast-injured patients? *Ulus Travma Acil Cerrahi Derg*. 2021 Jan;27(1):79-84. doi: 10.14744/tjtes.2020.87639.
22. Turégano-Fuentes F, Pérez-Díaz D, Sanz-Sánchez M, Alfici R, Ashkenazi I. Abdominal blast injuries: different patterns, severity, management, and prognosis according to the main mechanism of injury. *Eur J Trauma Emerg Surg*. 2014 Aug;40(4):451-60. doi: 10.1007/s00068-014-0397-4.
23. Galante N, Franceschetti L, Del Sordo S, Casali MB, Genovese U. Explosion-related deaths: An overview on forensic evaluation and implications. *Forensic Sci Med Pathol*. 2021 Sep;17(3):437-48. doi: 10.1007/s12024-021-00383-z.
24. Bala M, Rivkind AI, Zamir G, Hadar T, Gertsenshtein I, Mintz Y, et al. Abdominal trauma after terrorist bombing attacks exhibits a unique pattern of injury. *Ann Surg*. 2008 Aug;248(2):303-9. doi: 10.1097/SLA.0b013e318180a3f7.
25. Maitz A, Haussner F, Braumüller S, Hoffmann A, Lupu L, Wachter U, et al. Temporal-spatial organ response after blast-induced experimental blunt abdominal trauma. *FASEB J*. 2021 Dec;35(12):e22038. doi: 10.1096/fj.202100995R.
26. Kiriü N, Saitoh D, Sekine Y, Yamamura K, Sasa R, Fujita M, et al. Shock wave damage from the ventral side in primary blast injury: An experimental study in pigs. *Injury*. 2024 Dec;55(12):111982. doi: 10.1016/j.injury.2024.111982.
27. Bergmann-Leitner ES, Bobrov AG, Bolton JS, Rouse MD, Heyburn L, Pavlovic R, et al. Blast Waves Cause Immune System Dysfunction and Transient Bone Marrow Failure in a Mouse Model. *Front Bioeng Biotechnol*. 2022 Mar 22;10:821169. doi: 10.3389/fbioe.2022.821169.
28. Kempuraj D, Mohan RR. Blast injury: Impact to the cornea. *Exp Eye Res*. 2024 Jul;244:109915. doi: 10.1016/j.exer.2024.109915.
29. Mammadova N, Ghaisas S, Zenitsky G, Sakaguchi DS, Kanthasamy AG, Greenlee JJ, et al. Lasting Retinal Injury in a Mouse Model of Blast-Induced Trauma. *Am J Pathol*. 2017 Jul;187(7):1459-72. doi: 10.1016/j.ajpath.2017.03.005.
30. Anvarinia Y, Del Mar NA, Awad AM, Hossain S, Seetharaman AT, Ravindran S, et al. MicroRNA-based engineered mesenchymal stem cell extracellular vesicles to treat visual deficits after blast-induced trauma. *Exp Eye Res*. 2024 Oct;247:110031. doi: 10.1016/j.exer.2024.110031.
31. Hetzer SM, O'Connell C, Lallo V, Robson M, Evanson NK. Model matters: Differential outcomes in traumatic optic neuropathy pathophysiology between blunt and blast-wave mediated head injuries. *Exp Neurol*. 2024 Feb;372:114613. doi: 10.1016/j.expneurol.2023.114613. Epub 2023 Nov 22. PMID: 37995952; PMCID: PMC10870099.
32. Tong J, Kedar S, Ghate D, Gu L. Indirect Traumatic Optic Neuropathy Induced by Primary Blast: A Fluid-Structure Interaction Study. *J Biomech Eng*. 2019 Oct 1;141(10):101011. doi: 10.1115/1.4043668.
33. Karimi A, Razaghi R, Girkin CA, Downs JC. Ocular biomechanics during improvised explosive device blast: A computational study using eye-specific models. *Injury*. 2022 Apr;53(4):1401-15. doi: 10.1016/j.injury.2022.02.008.
34. Zhang Y, Kang X, Wu Q, Zheng Z, Ying J, Zhang MN. Explosive eye injuries: characteristics, traumatic mechanisms, and prognostic factors for poor visual outcomes. *Mil Med Res*. 2023 Jan 12;10(1):3. doi: 10.1186/s40779-022-00438-4.
35. Machaku D, Chambo M, Nkoronko M, Shadrack M, Sadiq A, Msuya D. Ocular, scrotal and abdominal trauma in a secondary blast injury. *J Surg Case Rep*. 2023 Mar 18;2023(3):rjad126. doi: 10.1093/jscr/rjad126.
36. Korkmaz İ, Çelikkaya ME, Atıcı A. Secondary blast injury: radiological characteristics of shrapnel injuries in children. *Emerg Radiol*. 2023 Jun;30(3):307-13. doi: 10.1007/s10140-023-02132-x.
37. Yammine K, Daher J, Otayek J, Jardaly A, Mansour J, Boulos K, et al. Beirut massive blast explosion: A unique injury pattern of the wounded population. *Injury*. 2023 Feb;54(2):448-52. doi: 10.1016/j.injury.2022.11.021.
38. Tsukada H, Nguyen TN, Breeze J, Masouros SD. The risk of fragment penetrating injury to the heart. *J Mech Behav Biomed Mater*. 2023 May;141:105776. doi: 10.1016/j.jmbbm.2023.105776.
39. Neubauer DC, Camacho M, O'Reilly EB, Brice M, Gurney JM, Martin MJ. The new face of war: Craniofacial injuries from Operation Inherent Resolve. *J Trauma Acute Care Surg*. 2022 Aug 1;93(2S Suppl 1):49-55. doi: 10.1097/TA.0000000000003700.
40. Shapira S, Givon A, Nadler R, Friedlander A, Epstein D. The Impact of Modern Warfare on the Nature of Spinal Injuries in Combat Trauma: A Retrospective Cohort Study. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2025 Aug 15;50(16):324-9. doi: 10.1097/BRS.0000000000005397.

41. Perez KG, Eskridge SL, Clouser MC, McCabe CT, Galarneau MR. A Focus on Non-Amputation Combat Extremity Injury: 2001-2018. *Mil Med.* 2022 May 3;187(5-6):e638-e643. doi: 10.1093/milmed/usab143.
42. Chukwu-Lobel R, Appukkuttan A, Edwards DS, Patel HDL. Burn injuries from the London suicide bombings: a new classification of blast-related thermal injuries. *Ann Burns Fire Disasters.* 2017 Dec 31;30(4):256-60.
43. Kim W, Kim D, Jeong SY, Lee Y, Lee H. Inhalation injury after a landmine explosion: a case report. *J Trauma Inj.* 2022 Aug;35(Suppl 1):35-9. doi: 10.20408/jti.2022.0005.
44. Cheran A, Gnaedinger A, Tolany A, Obi E, Tertysnyii S, Ratnayake A, et al. The Medical Impacts of Thermobaric Weapons: A Scoping Review. *Mil Med.* 2026 Mar 1;191(3-4):548-54. doi: 10.1093/milmed/usaf400.
45. Gama Sosa MA, De Gasperi R, Lind RH, Pryor D, Vargas DC, Perez Garcia GS, et al. Intramural hematomas and astrocytic infiltration precede perivascular inflammation in a rat model of repetitive low-level blast injury. *J Neuropathol Exp Neurol.* 2025 Apr 1;84(4):337-52. doi: 10.1093/jnen/nlaf003.
46. Hines SE, Gaitens JM, Brown CH, Glick DR, Chin KH, Reback MA, et al. Self-reported respiratory outcomes associated with blast exposure in post 9/11 veterans. *Respir Med.* 2022 Oct;202:106963. doi: 10.1016/j.rmed.2022.106963.
47. Jackson M, Chen S, Nguyen TT, Siedhoff HR, Balderrama A, Zuckerman A, et al. The Chronic Effects of a Single Low-Intensity Blast Exposure on Phosphoproteome Networks and Cognitive Function Influenced by Mutant Tau Overexpression. *Int J Mol Sci.* 2024 Mar 15;25(6):3338. doi: 10.3390/ijms25063338.
48. Liang R, Wang H, Gao J, Wang J, Zhang W, Qian A. Assessment model of blast injury: A narrative review. *iScience.* 2025 Jun 6;28(7):112830. doi: 10.1016/j.isci.2025.112830.
49. Walilko TJ, Sewsankar K, Wagner CD, Podolski A, Smith K, Zai L, et al. The Application of Machine Learning to Identify Large Animal Blast Exposure Thresholds. *Mil Med.* 2023 Mar 20;188(3-4):600-6. doi: 10.1093/milmed/usab410.
50. Al-Hajj S, Farran SH, Zgheib H, Tfaily MA, Halaoui A, Wehbe S, et al. The Beirut ammonium nitrate blast: A multicenter study to assess injury characteristics and outcomes. *J Trauma Acute Care Surg.* 2023 Feb 1;94(2):328-35. doi: 10.1097/TA.0000000000003745.
51. Tahtabasi M, Er S, Kalayci M. Imaging findings in patients after the bomb explosion in Somalia on December 28, 2019. *Clin Imaging.* 2021 Oct;78:230-9. doi: 10.1016/j.clinimag.2021.05.018.
52. Козлов СВ, Ткаченко ОВ, Зрожевський РС. Судово-медична характеристика тілесних ушкоджень при контактному вибуху гранати Ф-1. Судово-медична експертиза. 2016;13(1):78-80. doi: <https://doi.org/10.24061/2707-8728.1.2016.16>
53. Войченко ВВ, Козлов СВ, Ткаченко ОВ, Зубов ОЛ. Ідентифікація боєприпасів до автоматичного станкового гранатомету АГС-17 за морфологічним характером ушкоджень та уламків, вилучених з трупів під час судово-медичної експертизи. Судово-медична експертиза. 2018;14(1):62-5. doi: <https://doi.org/10.24061/2707-8728.1.2018.15>
54. Bachinskyi VT, Vanchulyak OYa, Savka IG, Kozlov SV, Zubko MD. Forensic assessment of gunshot injuries using modern optical research methods. *World of Medicine and Biology.* 2020;1(71):159-63. doi: <http://dx.doi.org/10.26724/2079-8334-2020-1-71-159-163>
55. Mikhailenko OV, Roshchin NN, Dyadik OO, Irkin IV, Malisheva TA, et al. Efficiency of Determination of Elemental Composition of Metals and their Topography in Objects of Biological Origin Using Spectrometers. *Indian Journal of Forensic Medicine and Toxicology.* 2021;15(1):1278-84 doi: <https://doi.org/10.37506/ijfamt.v15i1.13592>
56. Козлов СВ, Мішалов ВД, Сулоєв КМ, Козлова ЮВ. Патоморфологічні маркери вибухоіндукованої травми головного мозку. *Морфологія.* 2021;15.3:96-100. doi: <https://doi.org/10.26641/1997-9665.2021.3.96-100>
57. Чорна ВВ, Заводяк АЮ, Матвійчук МВ, Івашкевич ЄМ, Сивак ВМ, Слободян ВВ, та ін. Тяжкість ушкоджень при мінно-вибуховій травмі залежно від місця знаходження особи на момент вибуху. *Український журнал військової медицини.* 2023;4(3):70-7. doi: [https://doi.org/10.46847/ujmm.2023.3\(4\)-070](https://doi.org/10.46847/ujmm.2023.3(4)-070)
58. Mykhaulyenko OV, Mishalov VD, Kozlov SV, Varfolomeiev YA. Forensic characteristics of injuries from thermobaric explosive device. *Reports of Morphology.* 2024;30(2), 24-30. [https://doi.org/10.31393/morphology-journal-2024-30\(2\)-03](https://doi.org/10.31393/morphology-journal-2024-30(2)-03)
59. Дунаєв ОВ, Хижняк ВВ, Мішалов ВД, Левченко ВВ, Моргун АО. Судово-медична характеристика фізичних проявів вибухової травми. Судово-медична експертиза. 2025;1:55-9. doi: <https://doi.org/10.24061/2707-8728.1.2025.7>
60. Mykhaulyenko OV, Mishalov VD, Hrynchyshyna OV. Forensic characteristics of penetrating wounds and injury factors occurred after the explosion of a ballistic rocket. *Forensic Medicine.* 2025;2:79-96. doi: <https://doi.org/10.24061/2707-8728.2.2025.7>

References

1. Committee on Gulf War and Health: Long-Term Effects of Blast Exposures; Board on the Health of Select Populations; Institute of Medicine. *Gulf War and Health, Volume 9: Long-Term Effects of Blast Exposures.* Washington (DC): National Academies Press (US); 2014 Apr 14. doi: 10.17226/18253.
2. Jorolemon MR, Patel PJ. Blast Injuries. 2026 Feb 22. In: *StatPearls* [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2026 Jan. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK430914/>.

3. Li J, Zhang J, Shi M, Yu S, Ji M, Liang Y, et al. Crosstalk between Inflammation and Hemorrhage/Coagulation Disorders in Primary Blast Lung Injury. *Biomolecules*. 2023 Feb 10;13(2):351. doi: 10.3390/biom13020351.
4. Meng XY, Lu QY, Zhang JF, Li JF, Shi MY, Huang SY, et al. A novel animal model of primary blast lung injury and its pathological changes in mice. *J Trauma Acute Care Surg*. 2022 Oct 1;93(4):530-7. doi: 10.1097/TA.0000000000003571.
5. Meng X, Li J, Lu Q, Zhang J, Zheng Y, Liu Z, et al. Neutrophil extracellular traps mediate inflammation and coagulation dysregulation in primary blast lung injury. *Biochem Pharmacol*. 2025 Nov;241:117149. doi: 10.1016/j.bcp.2025.117149
6. Shao S, Wu S, Liu J, Liao Z, Wu P, Yao Y, et al. Dynamic pathophysiological features of early primary blast lung injury: a novel functional incapacity pig model. *Eur J Trauma Emerg Surg*. 2025 Jan 24;51(1):60. doi: 10.1007/s00068-024-02672-y.
7. Yang B, Feng L, Wang H, Yao Y, Xiong K, Wang S. Prediction of primary blast lung injury outcomes in goats using CT and injury factors. *Eur J Trauma Emerg Surg*. 2025 Nov 14;51(1):327. doi: 10.1007/s00068-025-03014-
8. Snapper DM, Reginauld B, Liaudanskaya V, Fitzpatrick V, Kim Y, Georgakoudi I, et al. Development of a novel bioengineered 3D brain-like tissue for studying primary blast-induced traumatic brain injury. *J Neurosci Res*. 2023 Jan;101(1):3-19. doi: 10.1002/jnr.25123.
9. Zhu X, Chu X, Wang H, Liao Z, Xiang H, Zhao W, et al. Investigating neuropathological changes and underlying neurobiological mechanisms in the early stages of primary blast-induced traumatic brain injury: Insights from a rat model. *Exp Neurol*. 2024 May;375:114731. doi: 10.1016/j.expneurol.2024.114731.
10. Rubio JE, Unnikrishnan G, Sajja VSSS, Van Albert S, Rossetti F, Skotak M, et al. Investigation of the direct and indirect mechanisms of primary blast insult to the brain. *Sci Rep*. 2021 Aug 6;11(1):16040. doi: 10.1038/s41598-021-95003-9.
11. Kozlova Y, Kozlov S. Changes of trace elements in the cerebellum and their influence on the rats behavior in elevated plus maze in the acute period of mild blast-induced brain injury. *J Trace Elem Med Biol*. 2023 Jul;78:127189. doi: 10.1016/j.jtemb.2023.127189.
12. Iacono D, Hatch K, Murphy EK, Cole RN, Post J, Leonessa F, et al. Proteomic Changes in the Hippocampus after Repeated Explosive-Driven Blasts. *J Proteome Res*. 2024 Jan 5;23(1):397-408. doi: 10.1021/acs.jproteome.3c00628.
13. Iacono D, Murphy EK, Stimpson CD, Leonessa F, Perl DP. Double Blast Wave Primary Effect on Synaptic, Glymphatic, Myelin, Neuronal and Neurovascular Markers. *Brain Sci*. 2023 Feb 8;13(2):286. doi: 10.3390/brainsci13020286. PMID: 36831830; PMCID: PMC9954059.
14. McNeil E, Walilko T, Hulbert LE, VanMeter JW, LaConte S, VandeVord P, et al. Development of a Minipig Model of BINT From Blast Exposure Using a Repeatable Mobile Shock Expansion Tube. *Mil Med*. 2023 Mar 20;188(3-4):591-9. doi: 10.1093/milmed/usab409.
15. Liu Y, Lu Y, Shao Y, Wu Y, He J, Wu C. Mechanism of the traumatic brain injury induced by blast wave using the energy assessment method. *Med Eng Phys*. 2022 Mar;101:103767. doi: 10.1016/j.medengphy.2022.103767.
16. Hussain SM, Saeed HK, Ali AH. Tinnitus after Blast Injury; a Prospective Study in Basrah, Iraq. *Int Tinnitus J*. 2022 Dec 1;26(2):122-6. doi: 10.5935/0946-5448.20220019.
17. Debenham L, Khan N, Nouhan B, Muzaffar J. A systematic review of otologic injuries sustained in civilian terrorist explosions. *Eur Arch Otorhinolaryngol*. 2024 May;281(5):2223-33. doi: 10.1007/s00405-023-08393-z.
18. Mühlmeier G, Tisch M. Blast and explosion traumas-effects on the middle and inner ear based on the example of Bundeswehr foreign missions. *HNO*. 2023 Jan;71(1):48-56. doi: 10.1007/s00106-022-01248-9.
19. Karaçaylı C, Özaydın ND, Şimşek K, Satar B. Relationship between hearing loss and body injuries caused by various firearms at a war site: A retrospective study. *Ulus Travma Acil Cerrahi Derg*. 2025 Aug;31(8):747-57. doi: 10.14744/tjtes.2025.52347.
20. Barylyak R, Skarzyński PH, Deja P, Kołodziejak A, Horoliuk DO, Skarzyński H. Audiological and Middle Ear Outcomes in Ukrainian Soldiers with Traumatic Tympanic Membrane Perforation. *Med Sci Monit*. 2025 Jul 11;31:e948326. doi: 10.12659/MSM.948326.
21. Taşlı H, Gökgöz MC, Çoban VK, Nagiyev Z, Karakoç Ö. Does tympanic membrane perforation have a protective effect on the inner ear in blast-injured patients? *Ulus Travma Acil Cerrahi Derg*. 2021 Jan;27(1):79-84. doi: 10.14744/tjtes.2020.87639.
22. Turégano-Fuentes F, Pérez-Díaz D, Sanz-Sánchez M, Alfici R, Ashkenazi I. Abdominal blast injuries: different patterns, severity, management, and prognosis according to the main mechanism of injury. *Eur J Trauma Emerg Surg*. 2014 Aug;40(4):451-60. doi: 10.1007/s00068-014-0397-4.
23. Galante N, Franceschetti L, Del Sordo S, Casali MB, Genovese U. Explosion-related deaths: An overview on forensic evaluation and implications. *Forensic Sci Med Pathol*. 2021 Sep;17(3):437-48. doi: 10.1007/s12024-021-00383-z.
24. Bala M, Rivkind AI, Zamir G, Hadar T, Gertsenshtein I, Mintz Y, et al. Abdominal trauma after terrorist bombing attacks exhibits a unique pattern of injury. *Ann Surg*. 2008 Aug;248(2):303-9. doi: 10.1097/SLA.0b013e318180a3f7.
25. Maitz A, Haussner F, Braumüller S, Hoffmann A, Lupu L, Wachter U, et al. Temporal-spatial organ response after blast-induced experimental blunt abdominal trauma. *FASEB J*. 2021 Dec;35(12):e22038. doi: 10.1096/fj.202100995R.

26. Kiri N, Saitoh D, Sekine Y, Yamamura K, Sasa R, Fujita M, et al. Shock wave damage from the ventral side in primary blast injury: An experimental study in pigs. *Injury*. 2024 Dec;55(12):111982. doi: 10.1016/j.injury.2024.111982.
27. Bergmann-Leitner ES, Bobrov AG, Bolton JS, Rouse MD, Heyburn L, Pavlovic R, et al. Blast Waves Cause Immune System Dysfunction and Transient Bone Marrow Failure in a Mouse Model. *Front Bioeng Biotechnol*. 2022 Mar 22;10:821169. doi: 10.3389/fbioe.2022.821169.
28. Kempuraj D, Mohan RR. Blast injury: Impact to the cornea. *Exp Eye Res*. 2024 Jul;244:109915. doi: 10.1016/j.exer.2024.109915.
29. Mammadova N, Ghaisas S, Zenitsky G, Sakaguchi DS, Kanthasamy AG, Greenlee JJ, et al. Lasting Retinal Injury in a Mouse Model of Blast-Induced Trauma. *Am J Pathol*. 2017 Jul;187(7):1459-72. doi: 10.1016/j.ajpath.2017.03.005.
30. Anvarinia Y, Del Mar NA, Awad AM, Hossain S, Seetharaman AT, Ravindran S, Roth S, Gangaraju R. MicroRNA-based engineered mesenchymal stem cell extracellular vesicles to treat visual deficits after blast-induced trauma. *Exp Eye Res*. 2024 Oct;247:110031. doi: 10.1016/j.exer.2024.110031. Epub 2024 Aug 10.
31. Hetzer SM, O'Connell C, Lallo V, Robson M, Evanson NK. Model matters: Differential outcomes in traumatic optic neuropathy pathophysiology between blunt and blast-wave mediated head injuries. *Exp Neurol*. 2024 Feb;372:114613. doi: 10.1016/j.expneurol.2023.114613.
32. Tong J, Kedar S, Ghate D, Gu L. Indirect Traumatic Optic Neuropathy Induced by Primary Blast: A Fluid-Structure Interaction Study. *J Biomech Eng*. 2019 Oct 1;141(10):101011. doi: 10.1115/1.4043668.
33. Karimi A, Razaghi R, Girkin CA, Downs JC. Ocular biomechanics during improvised explosive device blast: A computational study using eye-specific models. *Injury*. 2022 Apr;53(4):1401-15. doi: 10.1016/j.injury.2022.02.008.
34. Zhang Y, Kang X, Wu Q, Zheng Z, Ying J, Zhang MN. Explosive eye injuries: characteristics, traumatic mechanisms, and prognostic factors for poor visual outcomes. *Mil Med Res*. 2023 Jan 12;10(1):3. doi: 10.1186/s40779-022-00438-4.
35. Machaku D, Chambo M, Nkoronko M, Shadrack M, Sadiq A, Msuya D. Ocular, scrotal and abdominal trauma in a secondary blast injury. *J Surg Case Rep*. 2023 Mar 18;2023(3):rjad126. doi: 10.1093/jscr/rjad126.
36. Korkmaz İ, Çelikkaya ME, Atıcı A. Secondary blast injury: radiological characteristics of shrapnel injuries in children. *Emerg Radiol*. 2023 Jun;30(3):307-13. doi: 10.1007/s10140-023-02132-x.
37. Yammine K, Daher J, Otayek J, Jardaly A, Mansour J, Boulos K, et al. Beirut massive blast explosion: A unique injury pattern of the wounded population. *Injury*. 2023 Feb;54(2):448-52. doi: 10.1016/j.injury.2022.11.021.
38. Tsukada H, Nguyen TN, Breeze J, Masouros SD. The risk of fragment penetrating injury to the heart. *J Mech Behav Biomed Mater*. 2023 May;141:105776. doi: 10.1016/j.jmbbm.2023.105776.
39. Neubauer DC, Camacho M, O'Reilly EB, Brice M, Gurney JM, Martin MJ. The new face of war: Craniofacial injuries from Operation Inherent Resolve. *J Trauma Acute Care Surg*. 2022 Aug 1;93(2S Suppl 1):49-55. doi: 10.1097/TA.0000000000003700.
40. Shapira S, Givon A, Nadler R, Friedlander A, Epstein D. The Impact of Modern Warfare on the Nature of Spinal Injuries in Combat Trauma: A Retrospective Cohort Study. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2025 Aug 15;50(16):E324-E329. doi: 10.1097/BRS.0000000000005397.
41. Perez KG, Eskridge SL, Clouser MC, McCabe CT, Galarneau MR. A Focus on Non-Amputation Combat Extremity Injury: 2001-2018. *Mil Med*. 2022 May 3;187(5-6):638-43. doi: 10.1093/milmed/usab143.
42. Chukwu-Lobelu R, Appukuttan A, Edwards DS, Patel HDL. Burn injuries from the London suicide bombings: a new classification of blast-related thermal injuries. *Ann Burns Fire Disasters*. 2017 Dec 31;30(4):256-60.
43. Kim W, Kim D, Jeong SY, Lee Y, Lee H. Inhalation injury after a landmine explosion: a case report. *J Trauma Inj*. 2022 Aug;35(Suppl 1):35-9. doi: 10.20408/jti.2022.0005.
44. Cheran A, Gnaedinger A, Tolany A, Obi E, Tertysnyy S, Ratnayake A, et al. The Medical Impacts of Thermobaric Weapons: A Scoping Review. *Mil Med*. 2026 Mar 1;191(3-4):548-54. doi: 10.1093/milmed/usaf400.
45. Gama Sosa MA, De Gasperi R, Lind RH, Pryor D, Vargas DC, Perez Garcia GS, et al. Intramural hematomas and astrocytic infiltration precede perivascular inflammation in a rat model of repetitive low-level blast injury. *J Neuropathol Exp Neurol*. 2025 Apr 1;84(4):337-52. doi: 10.1093/jnen/nlaf003.
46. Hines SE, Gaitens JM, Brown CH, Glick DR, Chin KH, Reback MA, et al. Self-reported respiratory outcomes associated with blast exposure in post 9/11 veterans. *Respir Med*. 2022 Oct;202:106963. doi: 10.1016/j.rmed.2022.106963.
47. Jackson M, Chen S, Nguyen TT, Siedhoff HR, Balderrama A, Zuckerman A, Li R, et al. The Chronic Effects of a Single Low-Intensity Blast Exposure on Phosphoproteome Networks and Cognitive Function Influenced by Mutant Tau Overexpression. *Int J Mol Sci*. 2024 Mar 15;25(6):3338. doi: 10.3390/ijms25063338.
48. Liang R, Wang H, Gao J, Wang J, Zhang W, Qian A. Assessment model of blast injury: A narrative review. *iScience*. 2025 Jun 6;28(7):112830. doi: 10.1016/j.isci.2025.112830.
49. Walilko TJ, Sewsankar K, Wagner CD, Podolski A, Smith K, Zai L, et al. The Application of Machine Learning to Identify Large Animal Blast Exposure Thresholds. *Mil Med*. 2023 Mar 20;188(3-4):600-6. doi: 10.1093/milmed/usab410.
50. Al-Hajj S, Farran SH, Zgheib H, Tfaily MA, Halaoui A, Wehbe S, et al. Karam S, Fadlallah Y, Fahd F, Toufaily L, Arjinian S, Al-Zaghrini E, Al Hariri M, El Hussein M, Souaiby N, Mowafi H, Mufarrij AJ. The Beirut ammonium

- nitrate blast: A multicenter study to assess injury characteristics and outcomes. *J Trauma Acute Care Surg.* 2023 Feb 1;94(2):328-35. doi: 10.1097/TA.0000000000003745.
51. Tahtabasi M, Er S, Kalayci M. Imaging findings in patients after the bomb explosion in Somalia on December 28, 2019. *Clin Imaging.* 2021 Oct;78:230-9. doi: 10.1016/j.clinimag.2021.05.018.
 52. Kozlov SV, Tkachenko OV, Zrozhevs'kyi RS. Sudovo-medychna kharakterystyka tilesnykh ushkodzen' pry kontaktnomu vybukhu hranaty F-1 [Forensic characterization of blast injury caused by shrapnel grenade F-1]. *Sudovo-medychna ekspertyza.* 2016;13(1):78-80. doi: <https://doi.org/10.24061/2707-8728.1.2016.16> (in Ukrainian)
 53. Voichenko VV, Kozlov SV, Tkachenko OV, Zubov OL. Identyfikatsiia boieprypasiv do avtomatychnoho stankovoho hranatometu AHS-17 za morfolohichnym kharakterom ushkodzen' ta ulamkiv, vyluchenykh z trupiv pid chas sudovo-medychnoi ekspertyzy [Identification of the automatic grenade launcher's ammunition AGS-17 for the morphological character of damages and shrapnels from the copses after forensic medical examination]. *Sudovo-medychna ekspertyza.* 2018;14(1):62-5. doi: <https://doi.org/10.24061/2707-8728.1.2018.15> (in Ukrainian)
 54. Bachynskiy VT, Vanchulyak OYa, Savka IG, Kozlov SV, Zubko MD. Forensic assessment of gunshot injuries using modern optical research methods. *World of Medicine and Biology.* 2020;1(71):159-63. doi: <http://dx.doi.org/10.26724/2079-8334-2020-1-71-159-163>
 55. Mikhailenko OV, Roshchin HH, Dyadik OO, Irkin IV, Malisheva TA, et al. Efficiency of Determination of Elemental Composition of Metals and their Topography in Objects of Biological Origin Using Spectrometers. *Indian Journal of Forensic Medicine and Toxicology.* 2021;15(1):1278-84 doi: <https://doi.org/10.37506/ijfimt.v15i1.13592>
 56. Kozlov SV, Mishalov VD, Sulojev KM, Kozlova YuV. Patomorfologichni markery vybukhoindukovanoi travmy holovnoho mozku [Pathomorphological markers of blast-induced brain injury]. *Morphologia.* 2021;15(3):96-100. doi: <https://doi.org/10.26641/1997-9665.2021.3.96-100> (in Ukrainian)
 57. Chorna VV, Zavodiak Alu, Matviichuk MV, Ivashkevych YeM, Syvak VM, Slobodian VV, et al. Tiazhkist' ushkodzen' pry minno-vybukhovii travmi zalezno vid mistsia znakhodzhennia osoby na moment vybukhu [Severity of injuries in case of mine-blast trauma depending on the location of the person at the time of the explosion]. *Ukrains'kyi zhurnal viis'kovoi medytsyny.* 2023;4(3):70-7. doi: [https://doi.org/10.46847/ujmm.2023.3\(4\)-070](https://doi.org/10.46847/ujmm.2023.3(4)-070) (in Ukrainian)
 58. Mykhaylenko OV, Mishalov VD, Kozlov SV, Varfolomeiev YA. Forensic characteristics of injuries from thermo-baric explosive device. *Reports of Morphology.* 2024;30(2), 24-30. [https://doi.org/10.31393/morphology-journal-2024-30\(2\)-03](https://doi.org/10.31393/morphology-journal-2024-30(2)-03)
 59. Dunaiev OV, Khyzhniak VV, Mishalov VD, Levchenko VV, Morhun AO. Sudovo-medychna kharakterystyka fizychnykh proiaviv vybukhovoi travmy [Forensic and medical characteristics of physical manifestations of blast trauma]. *Sudovo-medychna ekspertyza.* 2025;1:55-9. doi: <https://doi.org/10.24061/2707-8728.1.2025.7> (in Ukrainian)
 60. Mykhailenko OV, Mishalov VD, Hrynchyshyna OV. Forensic characteristics of penetrating wounds and injury factors occurred after the explosion of a ballistic rocket. *Forensic Medicine.* 2025;2:79-96. doi: <https://doi.org/10.24061/2707-8728.2.2025.7>

Відомості про авторів:

Савка Іван Григорович – д.мед.н., професор закладу вищої освіти кафедри судової медицини та медичного правознавства Буковинського державного медичного університету (м.Чернівці, Україна). e-mail: savka.ivan@bsmu.edu.ua; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2969-1306>; Researcher ID: <http://www.researcherid.com/D-1722-2017>; Scopus ID: 14831503200

Коробко Ігор Сергійович – кандидат медичних наук, доцент закладу вищої освіти кафедри біології, гістології, патоморфології та судової медицини, Державний заклад «Луганський державний медичний університет»; вул. 16 Липня, буд. 36, м. Рівне, Україна, 33000. E-mail: Marjinsky@gmail.com; ORCID: 0000-0002-1292-9971; Scopus ID: 57209657879

Савка Віталій Григорович – к.мед.н., асистент закладу вищої освіти кафедри медицини катастроф та військової медицини Буковинського державного медичного університету (м.Чернівці, Україна); e-mail: savka.vg@bsmu.edu.ua; ORCID: <http://orcid.org/0009-0002-4509-420X>; Scopus ID: 6504008395

Information about authors:

Ivan Savka – Doctor of Medical Science, MD, Professor of the Higher Education Institution, Department of the Forensic Medicine and Medical Law, Bukovinian State Medical University (Chernivtsi, Ukraine). e-mail: savka.ivan@bsmu.edu.ua; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2969-1306>; Researcher ID: <http://www.researcherid.com/D-1722-2017>; Scopus ID: 14831503200

Ihor Korobko – Candidate of Medical Sciences, PhD, Associate Professor of the Department of Biology, Histology, Pathomorphology and Forensic Medicine, State Institution "Luhansk State Medical University", Str. 16 Lypnia, 36, Rivne, Ukraine, 33000. E-mail: marjinsky@gmail.com; ORCID ID: 0000-0002-1292-9971; Scopus ID: 57209657879

Vitalii Savka – Candidate of Medical Science, assistant Higher Education Institution, Department of Disaster Medicine and Military Medicine, Bukovinian State Medical University (Chernivtsi, Ukraine); e-mail: savka.vg@bsmu.edu.ua; ORCID: <http://orcid.org/0009-0002-4509-420X>; Scopus ID: 6504008395

Надійшло до редакції 26.02. 2026 р.

Прорецензовано 17.03.2026 р.

Прийнято до друку 20.04.2026 р.